

### Флюидный режим формирования Олимпиадинского золото-сульфидного месторождения

Методами микротермометрии и КР-спектроскопии газовых и газовой-жидких включений в кварце определены *PTX*-параметры флюидов, сформировавших Олимпиадинское золото-сульфидное месторождение. Слабо-золотоносные метаморфогенные пирротин-кварцевые прожилки образовались при участии окисленного ( $\text{CO}_2 / \text{CH}_4 = 10\text{--}100$ ) азотно-углекислотного флюида при температурах 410–360 °С и давлении  $2,4 \pm 0,2$  кбар. Золото-арсенопиритовая минерализация была сформирована глубинным восстановленным ( $\text{CO}_2 / \text{CH}_4 \sim 1$ ) метан-углекислотно-азотным флюидом в интервале температур 360–300 °С при давлении  $1,2 \pm 0,1$  кбар, золото-антимонитовая – азотно-метановым флюидом при температурах 290–240 °С и давлении  $0,8 \pm 0,1$  кбар. Рудообразование протекало в гетерогенной среде при активном участии газовой фазы в качестве транспортирующего агента.

*Ключевые слова:* Олимпиадинское месторождение, флюидные включения, температура, давление, состав флюидов.

КРЯЖЕВ СЕРГЕЙ ГАВРИЛОВИЧ, доктор геолого-минералогических наук, начальник отдела, s34@mail.ru

БЕРКОВСКИЙ ЕВГЕНИЙ МИХАЙЛОВИЧ, инженер 1 категории

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Центральный научно-исследовательский геолого-разведочный институт цветных и благородных металлов» (ФГБУ «ЦНИГРИ»), г. Москва

### Fluid regime of Olimpiada gold deposit formation

S. G. KRYAZHEV, E. M. BERKOVSKY

Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals, Moscow

The *PTX*-parameters of the fluids formed the Olimpiada gold deposit were determined using microthermometry and Raman spectroscopy of carbonic ( $\text{CO}_2\text{-N}_2\text{-CH}_4$ ) and aqueous-carbonic inclusions in quartz. Weakly gold-bearing metamorphic pyrrhotite-quartz veinlets were formed by oxidized ( $\text{CO}_2 / \text{CH}_4 = 10\text{--}100$ ) nitrogen-carbon dioxide fluid at temperatures of 410–360 °C and a pressure of  $2,4 \pm 0,2$  kbar. Gold-arsenopyrite mineralization was formed by deep-seated reduced ( $\text{CO}_2 / \text{CH}_4 \sim 1$ ) methane-carbon dioxide-nitrogen fluid in the temperature range of 360–300 °C and pressure of  $1,2 \pm 0,1$  kbar. Gold-antimonite mineralization was formed by nitrogen-methane fluid at temperatures 290–240 °C and pressure  $0,8 \pm 0,1$  kbar. Gold transport was carried out in a boiling environment in carbonic phase.

*Key words:* Olimpiada deposit, fluid inclusions, temperature, pressure, composition of fluids.

Олимпиадинское золото-сульфидное месторождение – самый крупный золоторудный объект Енисейского кряжа и один из крупнейших в России ( $\text{Au} > 1,5$  тыс. т, по [20]). Перспективы обнаружения аналогичных золоторудных месторождений как в пределах Енисейской провинции, так и в других районах нашей страны определяют необходимость анализа условий формирования

подобных уникальных скоплений рудного вещества. С момента открытия в 1975 году и вплоть до настоящего времени ведутся интенсивные исследования Олимпиадинского месторождения. В монографиях и многочисленных научных статьях подробно охарактеризованы минералого-геохимические особенности оруденения и геолого-структурные условия его локализации [7, 10, 20, 21 и др.].

Методами изотопной геохронологии определена последовательность развития рудообразующих процессов (табл. 1).

Тем не менее некоторые аспекты, касающиеся генезиса месторождения, всё ещё требуют дополнительного изучения. В первую очередь, к ним относятся параметры флюидного режима рудообразования, такие как состав и вероятные источники рудоносных растворов на каждой стадии минерализации, механизмы их движения, давление при рудообразовании.

Проблемы, возникающие при решении указанных вопросов, обусловлены двумя главными причинами. Первая связана с отсутствием жильного кварца в составе продуктивной минерализации, которая представлена рассеянной вкрапленностью золотоносного арсенопирита во вмещающих породах, а также прожилками и вкрапленностью антимонита-бертьерита. Соответственно, классический метод анализа первичных флюидных включений в жильном кварце разных стадий в данном случае неприменим, необходимую информацию

**1. Последовательность геологических событий при формировании Олимпиадинского золоторудного месторождения**

Геологическое событие	Датированные образования (метод определения)	Изотопный возраст, млн лет	Ссылки
Осадконакопление	Метапелиты (Sm-Nd), кластогенные цирконы (U-Pb)	1450	[20]
Региональный метаморфизм низких давлений	Биотит (Ar-Ar)	970–950	[8]
Кристаллизация коллизионных гранитоидов Тейского комплекса (в т.ч. Чиримбинского и Тырадинского массива)	Циркон (U-Pb)	890–860	[2, 19]
Зональный контактовый метаморфизм	Биотит (Ar-Ar)	860–850	[8]
Коллизионный метаморфизм умеренных давлений в связи с надвигами западного направления	Биотит (Ar-Ar)	850–830	[8]
Коллизионный метаморфизм умеренных давлений в связи с надвигами восточного направления	Биотит (Ar-Ar)	800–780	[8]
Кристаллизация мусковита в рудах Олимпиадинского месторождения	Мусковит (Ar-Ar, Rb-Sr)	810–780	[3, 10]
Кристаллизация мусковита в рудах золото-кварцевого месторождения Советское	Мусковит в ассоциации с самородным золотом (Ar-Ar)	820–780	[9]
Кристаллизация постколлизионных гранитоидов Аяхтинского комплекса	Циркон (U-Pb)	760–750	[2]
Внедрение даек субщелочных-щелочных основных пород	Циркон, сфен (U-Pb)	710–700	[11, 19]
Кристаллизация тонкоиглольчатого высокозолотоносного арсенопирита (Олимпиадинское месторождение)	Арсенопирит (Re-Os)	689 ± 28	[19]
Формирование золото-сурьмяной (антимонит-бертьеритовой) минерализации	Мусковит (Ar-Ar)?	680–660	[3, 11, 19]
Внедрение даек щелочно-ультраосновных пород, карбонатитов, формирование щелочных метасоматитов	Биотит, порода (K-Ar), флогопит (Rb-Sr)	670–650	[11, 19]

можно получить только путём изучения различных генераций вторичных включений в дорудном кварце.

Вторая проблема обусловлена многокомпонентным составом газовой фазы рудообразующих флюидов. В результате исследования газовых включений в минералах Олимпиадинского месторождения методами криометрии или КР-спектроскопии (Раман-спектроскопии) установлено [3, 14], что они содержат смеси  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$  и  $\text{CH}_4$  с очень широким диапазоном соотношений компонентов. При комнатной температуре включения находятся в гомогенном состоянии. Для определения их плотности (а следовательно, и давления при рудообразовании) необходимо привлечение метода криометрии, основанного на измерении температур фазовых переходов во включениях после их глубокого охлаждения и гетерогенизации. В рассматриваемом случае при низких температурах во включениях наблюдаются три фазы – твёрдая  $\text{CO}_2$ , газообразный флюид  $\text{CH}_4 + \text{N}_2$  и жидкий флюид  $\text{CH}_4 + \text{N}_2$ . Гетерогенные равновесия в многофазных многокомпонентных системах описываются фундаментальным правилом фаз, согласно которому  $S$  (число степеней свободы) =  $K$  (число компонентов) + 2 –  $\Phi$  (число фаз). При наличии трёх фаз в трёхкомпонентной системе для её полного описания требуется независимое определение двух параметров (температуры гомогенизации и состава газовой смеси). Поэтому оценка плотности флюидных включений в кварце Олимпиадинского месторождения только методом криометрии принципиально невозможна, состав газов в каждом включении должен быть определен количественно методом КР-спектроскопии. В этом состоит основная причина большого разброса опубликованных для месторождения оценок давления (в целом от 0,3 до 3 кбар) при незакономерных его вариациях [3, 14, 20, 21].

Таким образом, решение обозначенной проблемы возможно только путём комплексного анализа включений методами криометрии и КР-спектроскопии, который может обеспечить точное определение плотности (молярного объёма) трёхкомпонентных газовых смесей. При этом следует отдельно подчеркнуть, что в связи с переменным составом флюида комплексному исследованию необходимо подвергать строго одно и то же включение. Данный подход и положен в основу нашей работы.

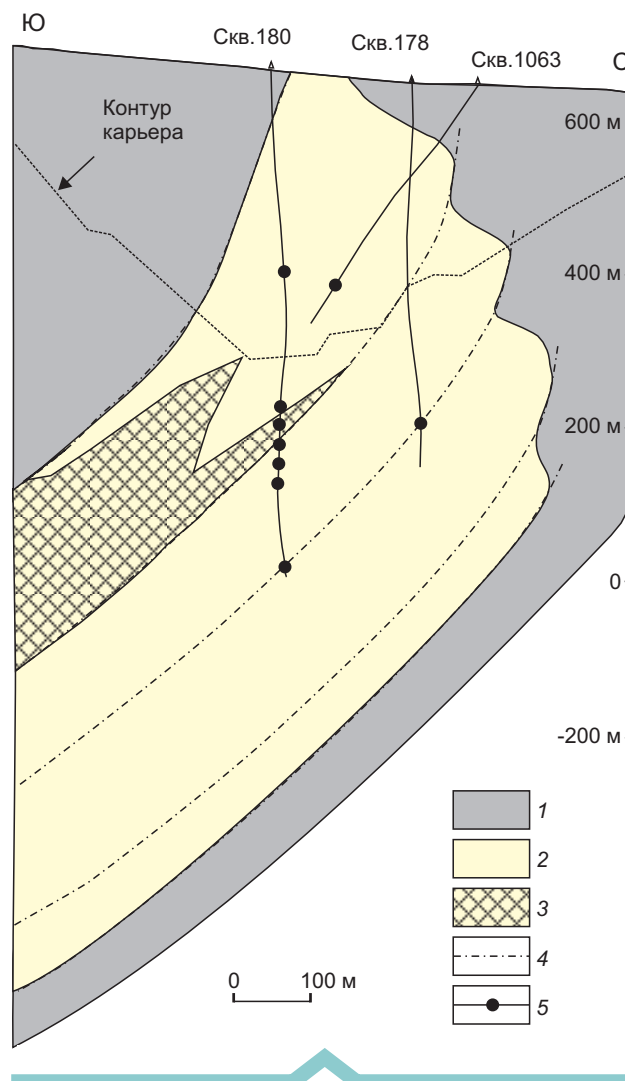
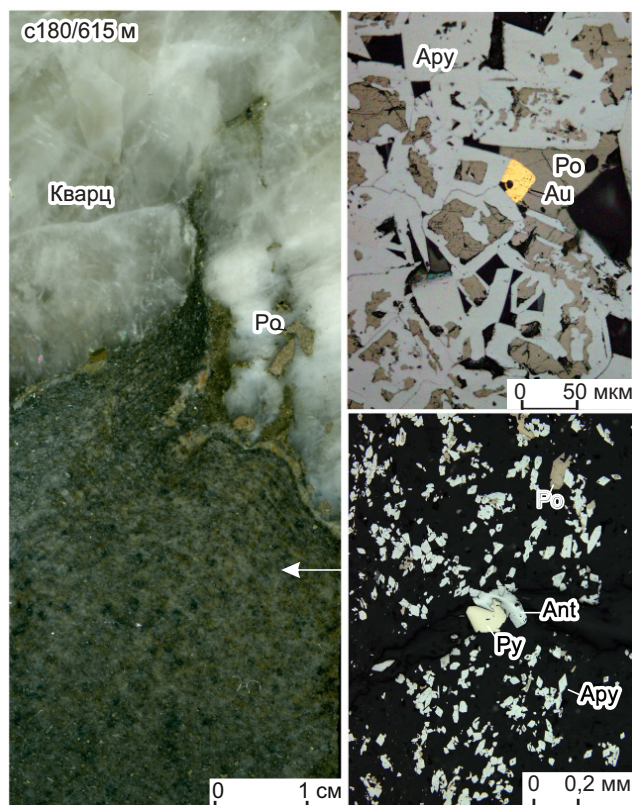


Рис. 1. Разрез Восточного участка Олимпиадинского месторождения. По [10, 20]:

1 – углеродистые кварц-сланцевые сланцы; 2 – рудное тело № 4: минерализованные слюисто-кварц-карбонатные и кварц-карбонатные породы; 3 – золото-сурьмяные руды без арсенопирита; 4 – разрывные нарушения; 5 – точки отбора образцов

#### Каменный материал и методы исследования.

Для изучения флюидных включений использованы 10 образцов руд Олимпиадинского месторождения из эталонной коллекции, хранящейся в ЦНИГРИ. Девять из них характеризуют оруденение Восточного участка (скважины 180, 178 и 1063), в пределах которого сосредоточены 90% запасов месторождения (рис. 1). Оруденение Западного участка представлено одним образцом (скв. 622/127).



**Рис. 2. Золото-сульфидная минерализация в рудах Олимпиадинского месторождения:**

образец № с180/615; минералы: Ару – арсенопирит, Ро – пирротин, Апт – антимонит, Ру – пирит, Ау – самородное золото

Изученные образцы руд (рис. 2) типичны для месторождения и преимущественно представляют собой слюдисто-кварц-карбонатные метапороды, содержащие пирротин-мусковит-кварцевые прожилки, тонкую сульфидную вкрапленность (арсенопирит, пирротин, спорадически пирит и антимонит), прожилки антимонита. Наблюдаемые в образцах взаимоотношения рудных минералов (замещение пирротина золотоносным арсенопиритом, который в свою очередь замещается антимонитом) полностью соответствуют существующим представлениям о последовательности минералообразования на Олимпиадинском месторождении [7, 10, 20, 21].

Микротермометрические анализы индивидуальных включений проводились в прозрачно-полированных пластинках с использованием криотермокамеры УМТК+ конструкции ЦНИГРИ, позволяющей выполнять охлаждение и нагревание

препаратов от  $-180$  до  $+600$  °С с измерением температур фазовых переходов во включениях посредством хромель-алюмелевой термопары с точностью  $\pm 0,2$  °С. Камеру калибровали при температурах тройной точки чистой  $\text{CO}_2$  ( $-56,6$  °С), температурах плавления льда в стандартных растворах  $\text{NaCl}$  (от  $-18$  до  $-1$  °С), температурах плавления  $\text{AgNO}_3$  ( $210$  °С) и  $\text{K}_2\text{CrO}_7$  ( $398$  °С).

Все измерения проводились в ходе нагревания препарата. Регистрировались температуры следующих фазовых переходов.

1. Температура гомогенизации азот-метановой смеси, которая происходит преимущественно в жидкую или окологритическую фазу (путём исчезновения мениска после уменьшения размеров газового пузырька).

2. Температура плавления  $\text{CO}_2$ , которая для чистой углекислоты составляет  $-56,6$  °С. В изученных образцах  $\text{CO}_2$  плавилась при более низкой температуре, что обусловлено присутствием метана и азота.

3. Температура гомогенизации флюида  $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{CH}_4$ , которая преимущественно происходила в жидкую фазу.

4. Температура полной гомогенизации газожидких включений, которая во всех случаях происходила в жидкую фазу путём исчезновения газового пузырька, то есть растворения газов в воде.

В каждой из присутствующих в образце ассоциаций сингенетичных включений были проанализированы по 5–10 индивидуальных вакуолей, полученные данные усреднялись. Затем составы газов в тех же вакуолях были количественно определены методом КР-спектроскопии. Полученные данные также усреднялись.

КР-спектры записывали на автоматическом КР-спектрометре XPlORA (Horiba Scientific), совмещенном с конфокальным микроскопом. Работа выполнена в Микрорамановской лаборатории МГУ им. М. В. Ломоносова на кафедре петрологии геологического факультета. В качестве источника света использовался лазер 532 нм (зелёный). Детектор – матричный ПЗС, охлаждаемый Пельтье элементом до  $-50$  °С. Пространственное разрешение конфокального микроскопа –  $0,5$  мкм. Итоговый результат, выдаваемый прибором, представлял собой КР-спектр, усреднённый по результатам двух измерений. Время получения одного спектра составляло 40 секунд. Обработка спектров (вычитание фона и расчёт площадей пиков) осуществлялась в программе DIFWIN1.

Для калибровки КР-спектрометра в качестве стандартов использованы природные включения в кварце из руд Олимпиадинского месторождения, содержащие практически чистые двухкомпонентные системы, параметры которых могут быть определены по температурам гомогенизации с использованием соответствующих диаграмм. По результатам анализа таких включений определены калибровочные коэффициенты, обеспечивающие удовлетворительную сходимость данных криометрии и КР-спектроскопии [1].

Мольный объём  $V$  ( $\text{см}^3/\text{моль}$ ) трёхкомпонентных включений рассчитывали по формуле [18]:  $V = 1 / (v\text{CO}_2 / 28,2 + (1 - v\text{CO}_2) / V_{\text{CH}_4+\text{N}_2})$ , где  $v\text{CO}_2$  – объёмная доля твёрдой  $\text{CO}_2$  (мольный объём

$28,2 \text{ см}^3/\text{моль}$ ) в момент гомогенизации фазы  $\text{CH}_4 + \text{N}_2$ , рассчитанная с учётом мольной доли  $\text{CO}_2$  во включении (по данным КР-спектроскопии),  $V_{\text{CH}_4+\text{N}_2}$  – мольный объём фазы  $\text{CH}_4 + \text{N}_2$ , определенный по температуре и типу её гомогенизации с учётом отношения  $\text{CH}_4 / \text{N}_2$  (по данным КР-спектроскопии) при использовании диаграммы состояния системы  $\text{CH}_4\text{-N}_2$ .

**Результаты исследований.** Включения, обнаруженные в изученных образцах жильного кварца, разделяются на два генетических типа [15]:

- первичные, которые встречаются поодиночке либо образуют объёмные изолированные кластеры, расположенные в объёме минерала вне связи с трещинами. Данные включения характеризуют

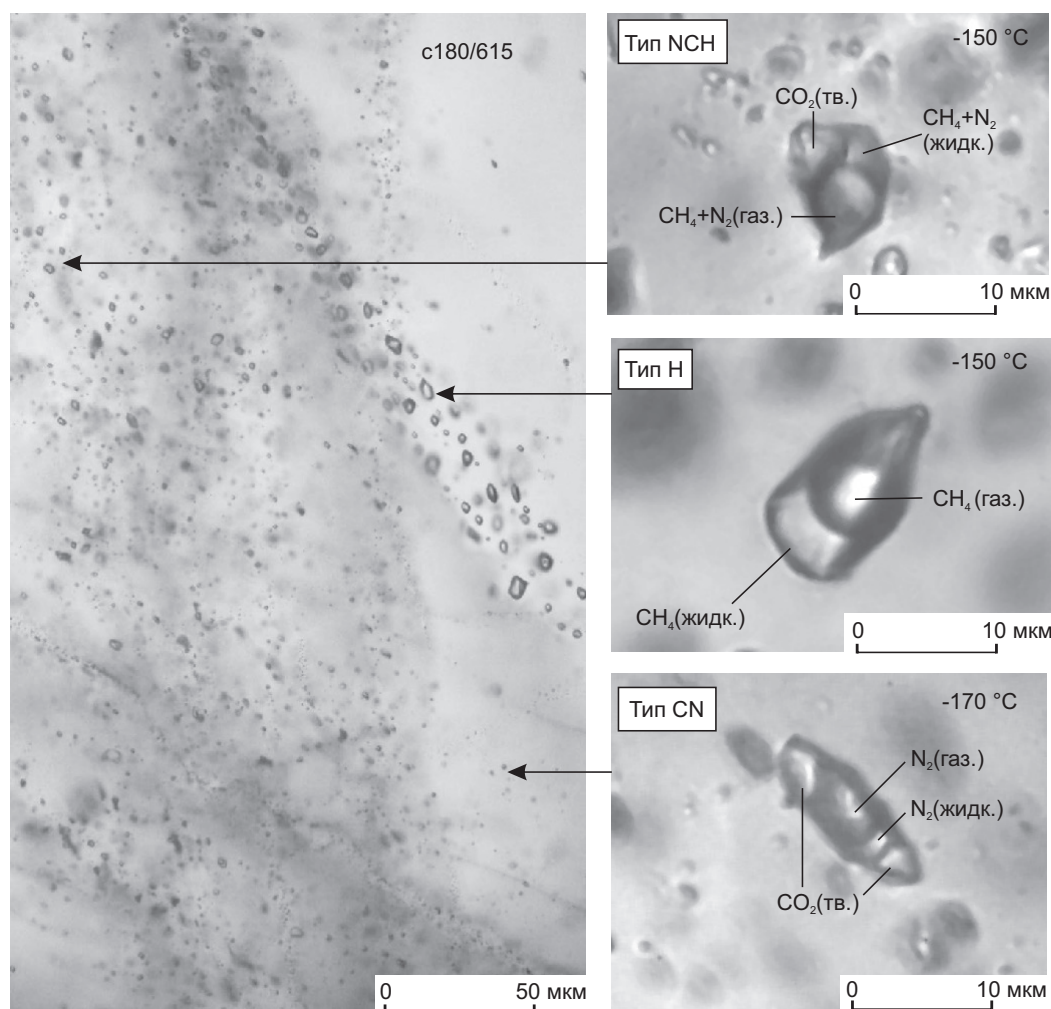


Рис. 3. Три генерации флюидных включений в кварце:

CN – первичные азотно-углекислотные, NCH – вторичные метан-углекислотно-азотные, H – вторичные метановые (с примесью азота); образец c180/615

условия формирования пирротин-мусковит-кварцевых прожилков;

- вторичные, залечивающие протяженные трещины, пересекающие края зёрен минерала и связанные с более поздними по отношению жильному кварцу минералообразующими процессами. Как показали исследования, существуют как минимум две генерации вторичных включений, которые часто находятся в одном образце и приурочены к разным системам пересекающихся трещин (рис. 3).

Результаты комплексных исследований первичных и вторичных включений приведены в табл. 2 и в графической форме представлены на рис. 4.

Установлено, что включения выделенных генераций значительно различаются по составу газовой фазы и криометрическим характеристикам.

Первичные включения имеют следующий состав (мольн. %):  $\text{CH}_4$  – 0,8–5,0,  $\text{N}_2$  – 21,3–59,0,  $\text{CO}_2$  – 38,5–77,9. По преобладающим компонентам данный тип включений обозначен как «CN». При охлаждении в них вымораживается твёрдая углекислота, которая занимает 22,5–42,5 % объёма вакуолей. Азот-метановая смесь во включениях данного типа гомогенизировалась в жидкую, газовую или критическую фазу при температурах ( $T_{\text{гом}} \text{CH}_4 + \text{N}_2$ ) от -150 до -147 °С. Температуры плавления углекислоты ( $T_{\text{пл}} \text{CO}_2$ ) составили

## 2. Результаты комплексных термобарогеохимических исследований индивидуальных флюидных включений в жильном кварце Олимпиадинского месторождения

Номер образца	Тип (группа включений)	Состав по данным КР-спектроскопии, мольн. %			Температуры фазовых переходов, °С			V, см <sup>3</sup> /моль	T <sub>гом</sub> ГЖВ, °С
		CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	T <sub>гом</sub> CH <sub>4</sub> +N <sub>2</sub>	T <sub>пл</sub> CO <sub>2</sub>	T <sub>гом</sub> C		
c178/420	NCH(1)	16,2	48,7	35,1	-126,6 ж	-70,1	–	65	310–320
	NCH(2)	28,0	57,9	14,1	-125,0 ж	-73,3	–	64	
	H	94,9	1,9	3,2	–	-94,5	-79,5	79	260–290
c180/215	H	94,5	4,8	0,7	-86,0 ж	–	–	80	240–250
c180/395	CN(1)	3,2	53,2	43,6	-149,0 ж	-61,3	-52,0	49	360–390
	CN(2)	1,1	42,4	56,6	-147,5 ж	-61,0	-45,5	49	
c180/412	H	87,8	8,4	3,8	–	-91,5	-86,3	78	255–265
c180/440	NCH	12,8	60,1	27,1	-132,4 ж	-69,0	–	66	320–350
c180/460	NCH	21,9	49,8	28,4	-124,2 ж	-69,8	–	65	340–360
c180/480	H	95,4	3,4	1,2	-84,5 ж	–	–	80	250–270
c180/615	CN	2,5	59,0	38,5	-150 ж	-61,2	-55,3	49	–
	NCH	25,6	46,1	28,3	-119,2 ж	-65,5	–	65	345–355
	H	94,9	4,6	0,5	-85,5 ж	–	–	80	240–260
c1063/250	NCH	25,6	28,6	45,8	-112,5 г	-64,5	-33,5к	64	300–340
c622/127	CN(1)	5,0	31,5	63,5	-147 к	-62,5	-31,5	51	370–410
	CN(2)	2,4	28,1	69,5	-147,5 г	-60,0	-23,3	49	
	CN(3)	0,8	21,3	77,9	-148 г	-59,2	-11,5	51	–
	NCH	34,0	36,7	29,2	-110,0 ж	-63,0	–	65	–
	H	99,0	0,5	0,5	-84,5 ж	–	–	80	235–245

Примечание. Типы газовых включений: CN – первичные азотно-углекислотные, NCH – вторичные метан-углекислотно-азотные, H – вторичные метановые. Измеренные температуры фазовых переходов:  $T_{\text{гом}} \text{CH}_4 + \text{N}_2$  – гомогенизации азотно-метановой смеси в жидкую (ж), газовую (г) или критическую (к) фазу;  $T_{\text{пл}} \text{CO}_2$  – плавления углекислоты,  $T_{\text{гом}} \text{C}$  – гомогенизации флюида  $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{CH}_4$  в жидкую фазу (к – в критическую фазу). V – мольный объём флюида, рассчитанный по данным криометрии и КР – спектроскопии по методике [18].  $T_{\text{гом}} \text{ГЖВ}$  – температуры гомогенизации газовой-жидких включений, ассоциирующих с газовыми (путём растворения газов в воде). В каждой строке представлены усреднённые данные анализа 5–10 индивидуальных вакуолей, принадлежащих к одной группе сингенетических включений.

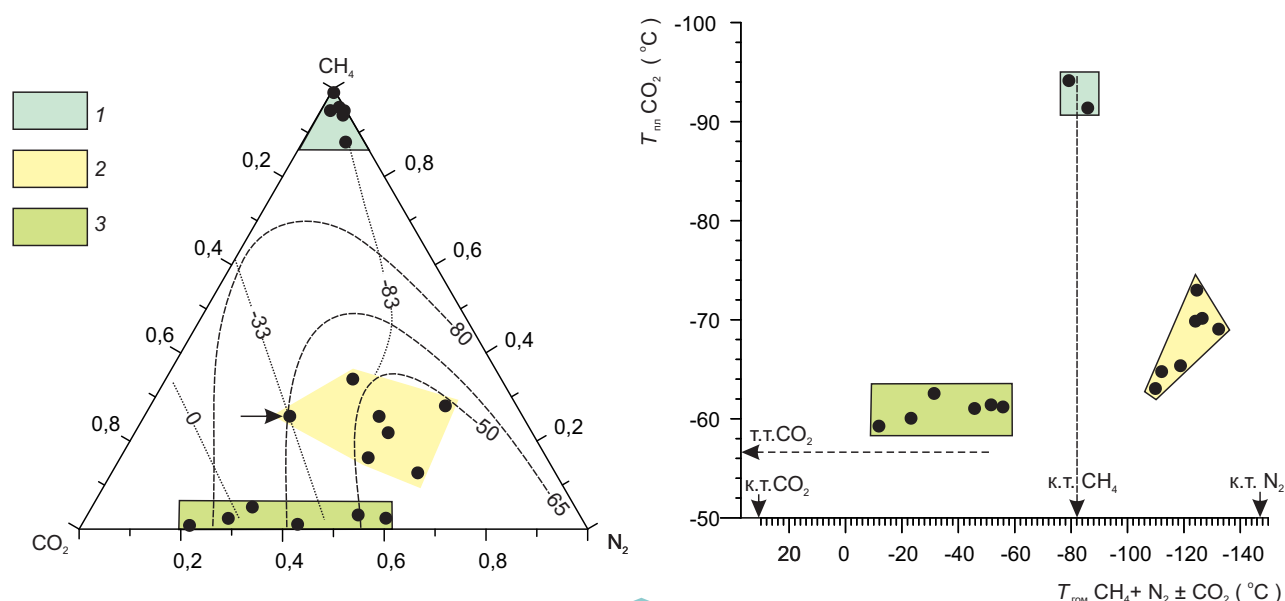


Рис. 4. Состав и криометрические характеристики газовых включений в кварце Олимпиадинского месторождения:

А – данные КР-спектроскопии, пунктирные линии – изохоры, точечные линии – изотермы критических переходов в системе  $N_2 + CH_4 + CO_2$  [16]; Б – данные криометрии; к.т. – критическая точка, т.т. – тройная точка, стрелкой показана фигуративная точка, соответствующая образцу с1063/250; тип включений: 1 – Н, 2 – NCH, 3 – CN

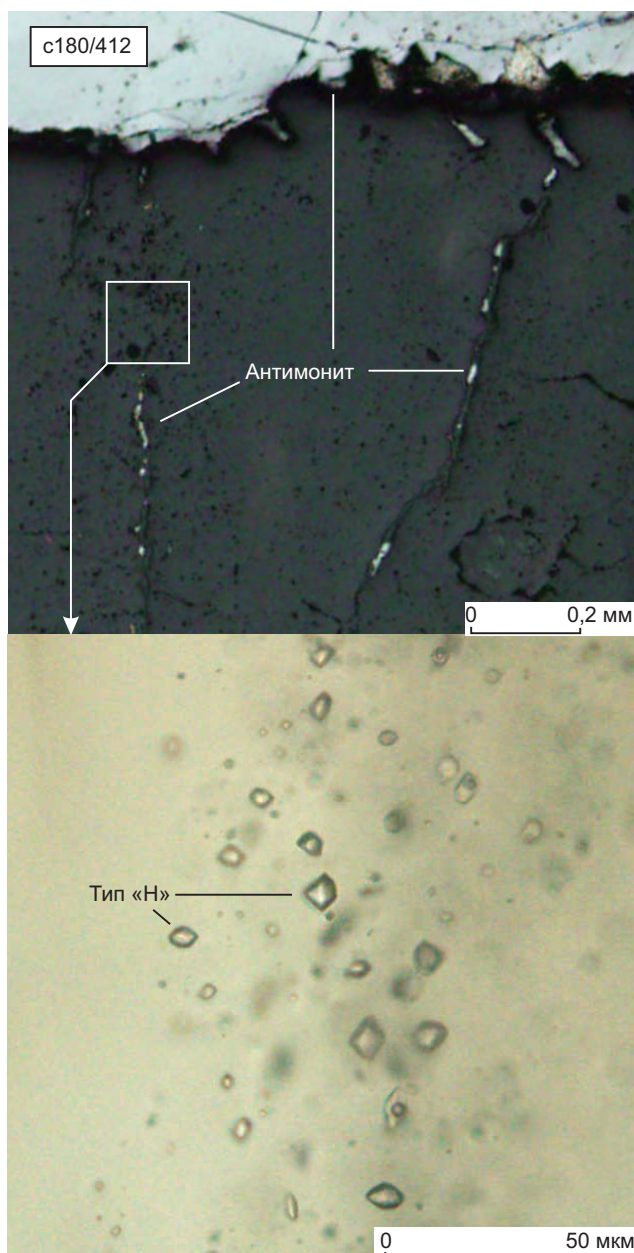
-62,5...-59,5 °С. После плавления  $CO_2$  флюид  $CO_2 + N_2 + CH_4$  гомогенизировался в жидкую фазу при температурах ( $T_{гом}$ , °С) -55,3...-11,5 °С. Мольный объём флюида, рассчитанный для первичных включений на основе полученных данных, составляет 49–51 см<sup>3</sup>/моль.

**Вторичные включения**, залечивающие позднюю систему прямолинейных трещин, заполнены преимущественно плотным метаном с небольшой примесью азота и углекислоты (мольн. %:  $CH_4$  – 87,8–99,0,  $N_2$  – 0,5–8,4,  $CO_2$  – 0,5–3,8) и обозначены как тип «Н». Флюид во включениях данного типа гомогенизировался в жидкую фазу (но вблизи критической точки) при температурах ( $T_{гом} CH_4 + N_2 \pm CO_2$ ) -86,3...-79,5 °С. Твёрдая углекислота наблюдалась редко и только в наиболее крупных вакуолях в виде небольшого (не более 1–1,5 об. %) кристаллика. Температуры её плавления ( $T_{пл} CO_2$ ) составили -94,5...-85,0 °С. Мольный объём флюида, заключённого во включениях данной генерации, составляет 78–80 см<sup>3</sup>/моль.

В образце с180/412 включения типа «Н» залечивают трещины вместе с выделениями антимонита (рис. 5). Это даёт основание утверждать, что полученные по ним термобарогеохимичес-

кие данные характеризуют условия формирования позднего продуктивного золото-сурьмяного (бертьерит-антимонитового) минерального комплекса.

**Вторичные включения**, залечивающие более раннюю систему трещин, в сопоставимых долях содержат все три газовых компонента (мольн. %):  $CH_4$  – 12,8–34,0,  $N_2$  – 28,6–60,1,  $CO_2$  – 14,1–45,8. Такие метан-углекислотно-азотные включения обозначены как тип «NCH». При охлаждении в них вымораживается твёрдая углекислота, которая занимает в вакуолях от 6 до 20 об. %. Азот-метановая смесь во включениях данного типа гомогенизировалась преимущественно в жидкую фазу при температурах ( $T_{гом} CH_4 + N_2$ ) -132,4...-110,0 °С. Температуры плавления углекислоты ( $T_{пл} CO_2$ ) составили -73,3...-63,0 °С. В одной группе включений (обр. с1063/250) после гомогенизации азот-метановой смеси в газовую фазу при -112 °С и плавления углекислоты при -64,5 °С образовался жидкий флюид  $CO_2 + N_2 + CH_4$ , который гомогенизировался путём исчезновения мениска в критическую фазу при -33,5 °С. Измеренная температура точно соответствует критической для флюида данного состава и плотности (см. рис. 4),



**Рис. 5. Флюидные включения в кварце (тип Н), сингенетичные с антимонитом. Фото полированной пластины в отражённом и проходящем свете**

что служит дополнительным свидетельством правильности калибровки КР-спектрометра и определения параметров включений, содержащих трёхкомпонентные газовые смеси.

Мольный объём, рассчитанный для вторичных включений типа «NCH», составляет 64–66 см<sup>3</sup>/моль. Поскольку данная генерация вторичных включений залечивает более раннюю систе-

му трещин, чем включения типа «Н» (см. рис. 3), её вполне обоснованно можно связать со стадией рудообразования, предшествующей отложению антимонит-бертьеритовой минерализации, а именно с формированием вкрапленности золотоносного арсенопирита в породах, вмещающих кварцевые прожилки. Такой вывод согласуется с закономерным присутствием включений аналогичного состава только в зонах развития золото-арсенопиритовой минерализации [3, 14].

*Давление при рудообразовании.* Как свидетельствуют полученные результаты, при значительных вариациях состава и криометрических показателей газовые включения каждой генерации имеют достаточно строго определённую плотность (мольный объём) и, следовательно, были захвачены при близких *PT*-условиях. Для оценки давления необходимо определить наклон изохоры, характеризующей флюид соответствующего состава и плотности, что было выполнено с использованием программного пакета FLUIDS [17].

Температуру захвата газовых включений можно определить по температурам гомогенизации сингенетичных газожидких включений (см. табл. 2), которые закономерно присутствуют в каждой ассоциации (рис. 6). Для первичных включений типа «CN» эти температуры составляют 410–360 °С, для вторичных типа «NCH» – 360–300 °С, для вторичных типа «Н» – 290–240 °С.

Диапазоны давления, соответствующие отрезкам изохор в указанных температурных интервалах, показаны на рис. 7. Для первичных азотно-углекислотных включений (тип «CN») получены значения 2,6–2,2 кбар (мольный объём 49–51 см<sup>3</sup>/моль, температуры захвата 410–360 °С). Давления, оценённые по вторичным метан-углекислотно-азотным включениям (тип «NCH»), составили 1,4–1,1 кбар (мольный объём 64–66 см<sup>3</sup>/моль, температура 360–300 °С), по вторичным метановым включениям (тип «Н») – 0,9–0,7 кбар (мольный объём 78–80 см<sup>3</sup>/моль, температуры 290–240 °С). Следует отметить, что полученные *PT*-характеристики точно соответствуют условиям минералообразования, так как получены по ассоциациям газожидких и газовых включений, захваченных из гетерогенной минералообразующей среды [15].

Таким образом, результаты исследований свидетельствуют о том, что формирование Олимпиадинского месторождения протекало дискретно в гетерогенной среде при участии углекислотно-

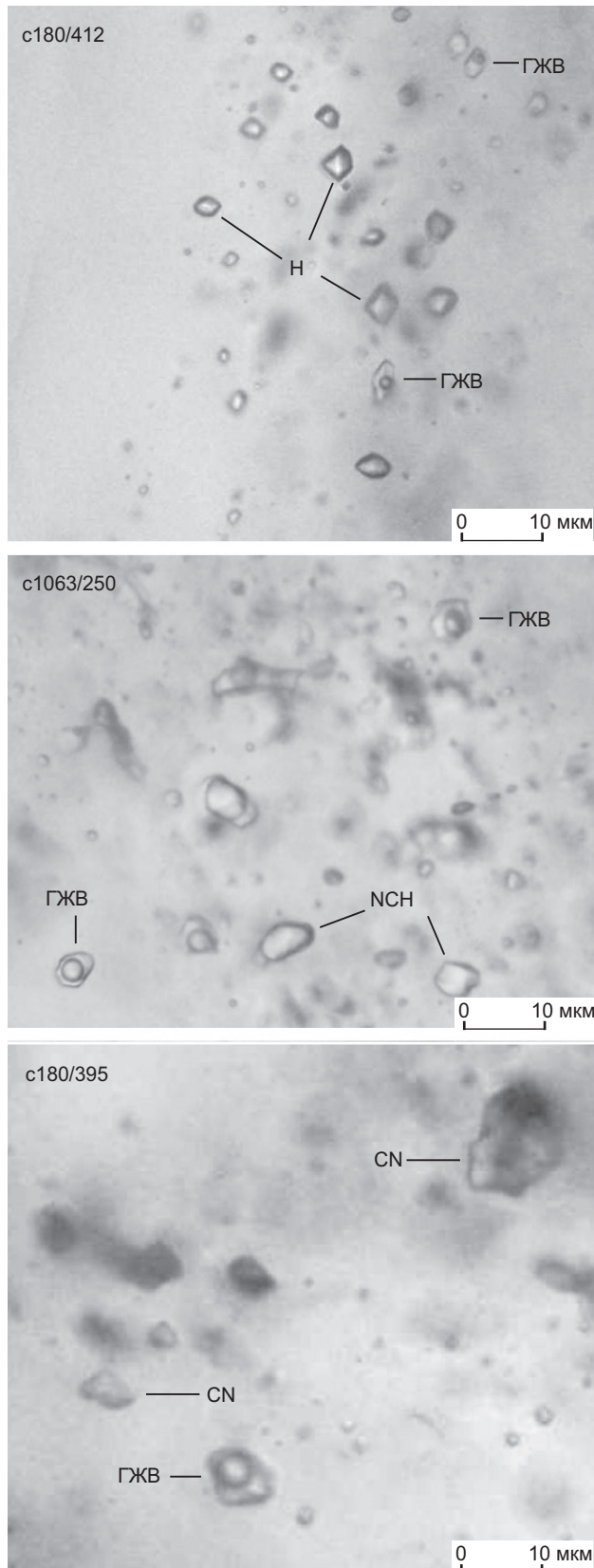


Рис. 6. Ассоциации сингенетических газовых (типы CN, NCH, Н) и газожидких (ГЖВ) включений

азотно-метановых флюидов переменного состава на фоне снижения температуры от 410 до 240 °С и скачкообразных изменений давления от 2,4 до 1,2 и далее до 0,8 кбар. В условиях литостатического градиента указанные давления соответствуют глубинам от ~10 до 5–3 км от палеоповерхности.

**Обсуждение результатов.** В результате исследований установлено, что совмещённые в рудах Олимпиадинского месторождения различные по продуктивности минеральные комплексы были сформированы на разных глубинах при участии флюидов разного состава. Это даёт основание предполагать, что золото поступало в область рудоотложения неоднократно из нескольких источников. Для определения вероятных источников рудного вещества следует рассмотреть существующие геохронологические и изотопно-геохимические данные.

Время образования пирротин-мусковит-кварцевых прожилков с учётом Ar-Ar и Rb-Sr датировок мусковита можно ограничить интервалом 810–780 млн лет (см. табл. 1). При этом необходимо отметить, что нижний предел температур захвата первичных включений в кварце (360 °С) отвечает условиям закрытия K-Ar системы слюд [8].

На Енисейском кряже магматические породы близкого возраста не известны. Согласно существующим представлениям [8], указанный период времени отвечает окончанию коллизионного метаморфизма, связанного с формированием надвигов в Татарско-Ишимбинской системе разломов. В это же время были образованы многочисленные золотоносные кварцевые жилы, которые имеют весьма сложное строение и несут явные признаки метаморфогенного происхождения [9, 11, 13]. В работе [13] убедительно показано, что основным источником рудного вещества золото-кварцевых месторождений на Енисейском кряже могли служить вмещающие углеродисто-терригенные толщи, обогащённые золотом на этапе осадконакопления.

Пирротин-мусковит-кварцевые прожилки, распространённые в рудах Олимпиадинского месторождения, по морфологии также могут быть отнесены к метаморфогенным образованиям (см. рис. 2). Пирротин обогащён тяжёлым изотопом <sup>34</sup>S [5, 20] и характеризуется широким диапазоном значений δ<sup>34</sup>S от +6 до +20‰, что указывает на гидротермально-осадочную природу серы [4] и свидетельствует в пользу метаморфогенного

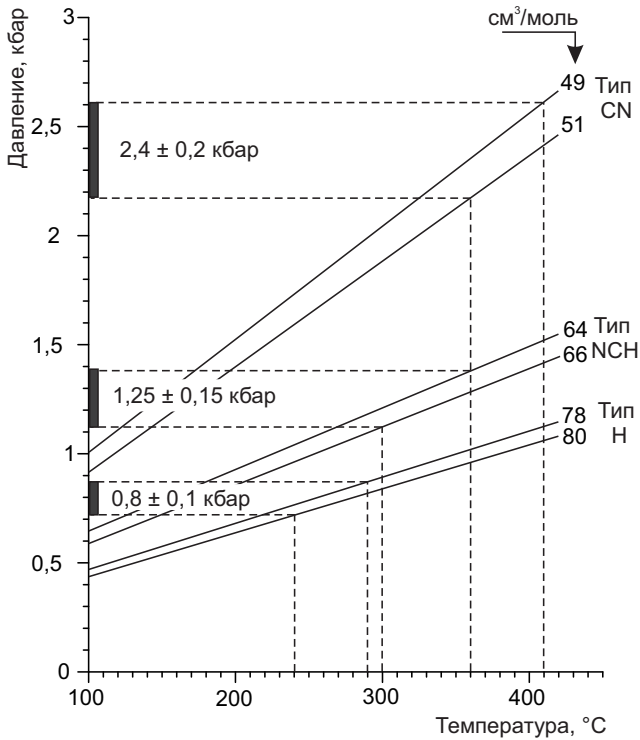


Рис. 7. Оценка давления при захвате флюидных включений в кварце Олимпиадинского месторождения

происхождения пирротин-кварцевой минерализации.

В монофракциях пирротина концентрации золота в среднем составляют 9 г/т (при вариациях от 0,3 до 70 г/т, 118 определений [10]). Среднее содержание пирротина в рудах оценивается в 1,5–3% [10]. Следовательно, с метаморфогенной минерализацией могут быть связаны не более 5% от общего количества Au в рудах месторождения (что, однако, составляет 50–100 тонн металла).

Таким образом, изученные первичные включения в кварце, содержащие окисленные азотно-углекислотные флюиды ( $\text{CO}_2 / \text{CH}_4 = 10\text{--}100$ ), характеризуют метаморфогенно-гидротермальный этап рудообразования, в течение которого на глубинах около 10 км при температурах 410–360 °C в процессе тектонических движений была сформирована слабозолотоносная прожилково-вкрапленная минерализация.

Основной объем золото-сульфидного оруденения, преимущественно представленного вкрапленностью высокозолотоносного арсенопирита (Au в среднем 100–300 г/т, по [10, 21]) и сурьмя-

ными минералами в парагенезисе с самородным золотом, был сформирован восстановленными флюидами ( $\text{CO}_2 / \text{CH}_4$  от ~1 до 0,01) при более низких температурах (360–240 °C) в обстановке существенно меньших глубин. Значительное снижение давления (от 2,4 до 1,2–0,8 кбар), предшествующее формированию золото-мышьяково-сурьмяных руд, вероятнее всего связано с воздыманием территории, денудацией и уменьшением глубин развития минералообразующих процессов с ~10 до ~5–3 км от палеоповерхности.

Данная оценка хорошо согласуется с существующими геодинамическими реконструкциями [8], согласно которым, в результате надвигов 780 млн лет назад метаморфозы рудовмещающей кординской свиты оказались перекрыты метатерригенно-карбонатными толщами тейской серии мощностью 5–7 км. Амплитуда последующего за этим постколлизийного быстрого подъема и эрозии составила не менее чем 4–5 км.

Время формирования золото-сульфидного оруденения (690–660 млн лет) совпадает с возрастом рифтогенных интрузивных комплексов, представленных дайками субщелочных и щелочных пород основного и ультраосновного состава (см. табл. 1), что неоднократно отмечалось в литературе [11, 19 и др.]. На вероятную связь золото-сульфидного оруденения с глубинным магматизмом указывает изотопный состав осмия [19], а также серы в золотоносных сульфидах [4, 5, 20]. Основная масса арсенопирита и антимонита характеризуется узким диапазоном значений  $\delta^{34}\text{S} = +4,5 \pm 1\%$ . Данный факт указывает на единый магматический источник рудных компонентов, входящих в состав золото-сульфидной мышьяково-сурьмяной минерализации Олимпиадинского месторождения. Наиболее вероятно, что таким источником служил длительно эволюционирующий глубинный очаг мантийно-коровой природы.

Здесь следует отдельно подчеркнуть, что сделанный вывод относится исключительно к золоту и его элементам-спутникам (As, Sb, S). Основным источником углекислоты, азота и метана, вероятнее всего, служили углеродисто-терригенные толщи [12]. Имеющиеся определения изотопного состава суммарного углерода включений в кварце ( $\delta^{13}\text{C} (\text{CH}_4 + \text{CO}_2) = -17 \pm 1\%$ ) этому выводу не противоречат [6]. Необходимо также отметить, что азот и метан в системе вода–порода ведут себя по-разному в зависимости от форм нахождения углерода и условий газогенерации,

что приводит к широким вариациям состава пространённых в природе азот-метановых гидротерм [12]. Возможно, этим и обусловлена изменчивость состава газов в рассматриваемых нами рудообразующих флюидных палеосистемах.

В аспекте обсуждаемых процессов возникает резонный вопрос: почему формирование крупнообъёмного золото-сульфидного оруденения не отразилось на изотопных K-Ar и Rb-Sr системах слюд в минерализованных породах? Ответ на него заключён в рассмотренных ниже особенностях флюидного режима рудообразования [6].

На глубинах 3–5 км в условиях литостатического давления движение поровых растворов весьма затруднено. Гидродинамическая связь с поверхностью отсутствует, температурные градиенты весьма незначительны. Как следствие, водно-солевые флюиды находятся практически в неподвижном состоянии. В рассматриваемом случае это подтверждается данными по изотопному составу кислорода. Установлено, что золото-арсенопиритовые руды и безрудные мусковит-кварц-карбонатные породы характеризуются одинаковыми значениями  $\delta^{18}\text{O}$  карбонатов ( $+21 \pm 1\%$ ), что свидетельствует о низком отношении вода/порода в системе.

Как отмечалось всеми исследователями флюидных включений, при формировании руд Олимпиадинского месторождения минералообразующая среда находилась в гетерогенном состоянии. Она была представлена водно-солевым раствором и относительно малоплотной газообразной углекислотно-азотно-метановой фазой. Известно, что в подобных системах происходит разделение химических элементов, причём в газообразную фазу преимущественно перераспределяются такие компоненты, как As, Sb, S и Au. На пузырьки газа в жидкости независимо от внешних условий постоянно действует архимедова сила, поэтому они неизбежно будут двигаться вверх с относительно высокой скоростью. Именно такой механизм мог обеспечить транспорт огромной массы рудного вещества на большие расстояния в условиях глубинного гидродинамического режима. Наблюдаемые широкие вариации составов газовых смесей в сингенетичных включениях (см. табл. 2, рис. 3) также указывают на движение углекислотно-азотно-метанового флюида в виде отдельных пузырьков.

При перманентном гетерогенном состоянии среды между фазами устанавливается устойчивое

равновесие, что подразумевает и постоянство pH и Eh в системе раствор–порода. В этом, на наш взгляд, заключается главная причина отсутствия на Олимпиадинском месторождении сопровождающих арсенопиритовую минерализацию метасоматитов [7], а также арсенопирит-кварцевых прожилков [10, 14].

Вторая причина состоит в щелочном характере восстановленных водно-азотно-метановых флюидов [12]. Очевидно, именно поэтому карбонатные породы не являлись для рудоносных растворов геохимическим барьером и оказались минерализованными практически во всем объёме. Исключения составляют прослойки кварц-карбонатных пород и мраморов, сложенных кальцитом, а также прожилки кварца. Арсенопирит (в отличие от антимонита) в них не встречается. Данная закономерность позволяет в качестве одной из главных причин рудоотложения указать наличие в породах железосодержащих минералов (железистых карбонатов и пирротина). По нашему мнению, именно кварц-кальцитовый состав пород в верхней части рудного тела № 4 [20] обусловил локализацию в них золото-антимонитовых руд, не содержащих арсенопирит (см. рис. 1).

Таким образом, сохранность изотопных K-Ar и Rb-Sr систем слюд можно рассматривать как ещё одно доказательство газового транспорта рудного вещества восстановленными флюидами. Состав и плотность включений таких флюидов можно использовать при типизации золоторудных проявлений, определении последовательности рудообразования и прогнозе скрытого оруденения.

В заключение необходимо отметить приуроченность Олимпиадинского месторождения к весьма благоприятной для рудоотложения структуре – крупному телу трещиноватых существенно карбонатных пород, заключённому в чехол слабопроницаемых пластичных углеродисто-слюдистых сланцев (см. рис. 1). Эта своеобразная «ловушка» для газообразных рудоносных флюидов, по-видимому, и обеспечила условия для уникального скопления рудного вещества.

**Выводы.** В результате выполненных исследований существенно уточнены параметры флюидного режима формирования Олимпиадинского золото-сульфидного месторождения. На основе комплексного применения методов криометрии и КР-спектроскопии точно определено флюидное давление при образовании разновозрастных минеральных комплексов.

Формирование слабопродуктивного прожилково-вкрапленного пирротин-кварцевого комплекса проходило при участии окисленного ( $\text{CO}_2 / \text{CH}_4 = 10\text{--}100$ ) азотно-углекислотного флюида при температурах 410–360 °С и давлении  $2,4 \pm 0,2$  кбар. Основной продуктивный, вкрапленный золото-арсенопиритовый комплекс был сформирован восстановленным ( $\text{CO}_2 / \text{CH}_4 \sim 1$ ) метан-углекислотно-азотным флюидом в интервале температур 360–300 °С при давлении  $1,25 \pm 0,15$  кбар. Вкрапленно-прожилковая золото-сурьмяная (бертьерит-антимонитовая) минерализация образовалась при участии метанового флюида при температурах 290–240 °С и давлении  $0,8 \pm 0,1$  кбар.

Значительное снижение давления (от 2,4 до 1,2–0,8 кбар) может быть связано с постколлизийным подъёмом территории, денудацией и уменьшением глубин развития минералообразующих процессов с ~10 км до 5–3 км от палеоповерхности.

Геохронологические и изотопно-геохимические данные свидетельствуют о формировании слабозолотоносных пирротин-кварцевых прожилков в период коллизийного метаморфизма 860–780 млн лет назад за счёт перераспределения вещества вмещающих пород, содержащих гидротермально-осадочные сульфиды. Золото-арсено-

пиритовая и бертьерит-антимонитовая минерализация образовалась в рифтогенной обстановке синхронно с дайками субщелочных-щелочных основных и ультраосновных пород в период ~690–660 млн лет. На вероятную связь золото-сульфидного оруденения с глубинным магматизмом указывает изотопный состав осмия и серы в арсенопирите и антимоните.

Полученные данные согласуются с представлениями о ведущей роли газового флюида как транспортирующего агента в рудообразующих системах, обеспечившего эффективную миграцию огромной массы золота и сопутствующих элементов на значительные расстояния в условиях глубинного гидродинамического режима.

Термобарогеохимические признаки золотоносных флюидов, сформировавших уникальный рудный объект, могут быть использованы в качестве критериев при прогнозировании, поисках и оценке золотого оруденения на Енисейском кряже.

*Авторы благодарят доктора геолого-минералогических наук, профессора П. Ю. Плечова и старшего научного сотрудника, кандидата геолого-минералогических наук В. Д. Щербакова за помощь в проведении КР-спектроскопии флюидных включений.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берковский Е. М., Кряжев С. Г. Определение состава и плотности флюида в системе  $\text{CO}_2\text{-CH}_4\text{-N}_2$  методами криометрии и КР-спектроскопии // XIX Всероссийская конференция по термобарогеохимии: тезисы докладов. – Новосибирск : ИПЦ НГУ, 2022. – С. 13–14.
2. Верниковский В. А., Метелкин Д. В., Верниковская А. Е. и др. Неопротерозойская тектоническая структура Енисейского кряжа и формирование западной окраины Сибирского кратона на основе новых геологических, палеомагнитных и геохронологических данных // Геология и геофизика. – 2016. – Т. 57, № 1. – С. 63–90.
3. Гибшер Н. А., Томиленко А. А., Сазонов А. М. и др. Олимпиадинское золоторудное месторождение (Енисейский кряж): температура, давление, состав рудообразующих флюидов,  $\delta^{34}\text{S}$  сульфидов,  $^3\text{He}/^4\text{He}$  флюидов,  $\text{Ar-Ar}$  возраст и продолжительность формирования // Геология и геофизика. – 2019. – Т. 60, № 9. – С. 1310–1329.
4. Кряжев С. Г. Генетические модели и критерии прогноза золоторудных месторождений в углеродистотерригенных комплексах: специальность 25.00.11 «Геология, поиски и разведка твёрдых полезных ископаемых, минерагения»: автореф. дисс. на соискание учёного степен. докт. геол.-мин. наук // Сергей Гаврилович Кряжев. – М. : ЦНИГРИ, 2017. – 52 с.
5. Кряжев С. Г., Гриненко В. А. Изотопный состав и источники серы золото-сульфидных месторождений Енисейского кряжа // XVIII Симпозиум по геохимии изотопов имени академика А. П. Виноградова: тезисы докладов. – М. : ГЕОХИ РАН, 2007. – С. 141–142.
6. Кряжев С. Г., Прасолов Э. М., Розин М. И., Сергеев С. А. Изотопный состав благородных газов флюидных включений в кварце месторождений золота терригенных комплексов // XX симпозиум по геохимии изотопов: тезисы докладов. – М. : ГЕОХИ РАН, 2013. – С. 200–203.
7. Ли Л. В. Олимпиадинское месторождение вкрапленных золото-сульфидных руд. – Красноярск : КНИИГиМС, 2003. – 120 с.
8. Лиханов И. И., Ревердатто В. В., Козлов П. С. Коллизийные метаморфические комплексы Енисейского кряжа: особенности эволюции, возрастные рубежи и скорость эксгумации // Геология и геофизика. – 2011. – Т. 52, № 10. – С. 1593–1611.

9. *Неволько П. А., Борисенко А. С., Травин А. В.* Возраст Советского золоторудного месторождения (Енисейский кряж) // *Металлогения древних и современных океанов.* – 2008. – № 1. – С. 225–228.
10. *Новожилов Ю. И., Гаврилов А. М.* Золото-сульфидные месторождения в углеродисто-терригенных толщах. – М.: ЦНИГРИ, 1999. – 175 с.
11. *Ножкин А. Д., Борисенко А. С., Неволько П. А.* Этапы позднепротерозойского магматизма и возрастные рубежи золотого оруденения Енисейского кряжа // *Геология и геофизика.* – 2011. – Т. 52, № 1. – С. 158–181.
12. *Павлов С. Х., Чудненко К. В.* Исследование происхождения метановых и азотных термальных вод методом компьютерного моделирования // *Известия Иркутского государственного университета.* Серия: Науки о Земле. – 2013. – Т. 6, № 1. – С. 133–146.
13. *Петров В. Г.* Условия золотоносности северной части Енисейского кряжа. Новосибирск: Наука, 1974. – 138 с.
14. *Прокофьев В. Ю.* Геохимические особенности рудообразующих флюидов гидротермальных месторождений золота различных генетических типов: (по данным исследования флюидных включений). – Новосибирск: Наука, Сибирская издательская фирма РАН, 2000. – 192 с.
15. *Реддер Э.* Флюидные включения в минералах. В 2 Т. Т. 1. – М.: Мир, 1987. – 560 с.
16. *Свердлова В. Г., Шведенков Г. Ю., Томиленко А. А.* и др. Определение объемов фазового перехода газ-жидкость в системе CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>-N<sub>2</sub> в связи с задачами термобарогеохимии // *Геохимия.* – 1999. – № 5. – С. 494–505.
17. *Bakker R. J.* Package FLUIDS 1. Computer programs for analysis of fluid inclusions data and for modeling bulk fluid properties // *Chemical Geology.* – 2003. – V. 194. – P. 3–23.
18. *Kerkhof A. M.* The system CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>-N<sub>2</sub> in fluid inclusions: theoretical modelling and geological applications. PhD. – Amsterdam: Vrije Universiteit, 1988. – 206 p.
19. *Naumov E. A., Borisenko A. S., Nevolko P. A.* et al. Gold-sulfide (Au-As) deposits of the Yenisei Ridge (Russia): age, sources of metals and nature of fluids/Proceedings of 13th Biennial SGA Meeting, 24–27 August (Anne-Sylvie André-Mayer, Michel Cathelineau, Philippe Muchez, Eric Pirard and Sven Sindern, eds.) – V. 1. – 2015. – P. 165–168.
20. *Sazonov A. M., Lobanov K. V., Zvyagina E. A.* et al. Olympiada Gold Deposit, Yenisei Ridge, Russia // *SEG Special Publications.* – 2020. – № 23. – P. 203–226.
21. *Silyanov S. A., Sazonov A. M., Naumov E. A.* et al. Mineral Paragenesis, formation stages and trace elements in sulfides of the Olympiada gold deposit (Yenisei Ridge, Russia) // *Ore Geology Reviews.* – 2022. – V. 143. – P. 104750

## REFERENCES

1. *Berkovskiy Ye. M., Kryazhev S. G.* Opredeleniye sostava i plotnosti flyuida v sisteme CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>-N<sub>2</sub> metodami kriometrii i KR-spektroskopii [Determination of the composition and density of the fluid in the CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>-N<sub>2</sub> system by cryometry and Raman spectroscopy]. XIX Vserossiyskaya konferentsiya po termobarogeokhimmii: tezisy dokladov, Novosibirsk, IPTS NGU, 2022, pp. 13–14. (In Russ.)
2. *Vernikovskiy V. A., Metelkin D. V., Vernikovskaya A. Ye.* et al. Neoproterozoyskaya tektonicheskaya struktura Yeniseyskogo kryazha i formirovaniye zapadnoy okrainy Sibirskogo kratona na osnove novykh geologicheskikh, paleomagnetnykh i geokhronologicheskikh dannykh [Neoproterozoic tectonic structure of the Yenisei Ridge and the formation of the western margin of the Siberian Craton based on new geological, paleomagnetic and geochronological data]. *Geologiya i geofizika*, 2016, V. 57, No. 1, pp. 63–90. (In Russ.)
3. *Gibsher N. A., Tomilenko A. A., Sazonov A. M.* et al. Olimpiadinskoye zolotorudnoye mestorozhdeniye (Yeniseiskii kryazh): temperatura, davleniye, sostav rudobrazuyushchikh flyuidov, δ<sup>34</sup>S sul'fidov, <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He flyuidov, Ar-Ar vozrast i prodolzhitel'nost' formirovaniya [Olimpiada gold deposit (Yenisei Ridge): temperature, pressure, composition of ore-forming fluids, δ<sup>34</sup>S sulfides, <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He fluids, Ar-Ar age and duration formation]. *Geologiya i geofizika*, 2019, V. 60, No. 9, pp. 1310–1329. (In Russ.)
4. *Kryazhev S. G.* Geneticheskiye modeli i kriterii prognoza zolotorudnykh mestorozhdeniy v uglerodistoterrigennykh kompleksakh [Genetic models and criteria for forecasting gold deposits in carbonaceous-terrigenous complexes]. Moscow, TSNIGRI publ., 2017, 52 p. (In Russ.)
5. *Kryazhev S. G., Grinenko V. A.* Izotopnyy sostav i istochniki sery zoloto-sul'fidnykh mestorozhdeniy Yeniseyskogo kryazha [Isotopic composition and sources of sulfur in gold-sulfide deposits of the Yenisei Ridge]. XVIII Simpozium po geokhimmii izotopov imeni akademika A. P. Vinogradova: tezisy dokladov, Moscow, GEOKHI RAN publ., 2007, pp. 141–142. (In Russ.)
6. *Kryazhev S. G., Prasolov E. M., Rozinov M. I., Sergeev S. A.* Izotopnyy sostav blagorodnykh gazov flyuidnykh vklyucheniye v kvartse mestorozhdeniy zolota terrigennykh kompleksov [Isotope composition of noble gases of fluid inclusions in quartz of gold

- deposits of terrigenous complexes]. XX simpozium po geokhimii izotopov: tezisy dokladov, Moscow, GEOKHI RAN publ., 2013, pp. 200–203. (In Russ.)
7. *Li L. V.* Olimpiadinskoye mestorozhdeniye vkraplennykh zoloto-sul'fidnykh rud [Olimpiada deposit of disseminated gold-sulfide ores]. Krasnoyarsk, KNIIGiMS publ., 2003, 120 p. (In Russ.)
  8. *Likhanov I. I., Reverdatto V. V., Kozlov P. S.* Kollizionnyye metamorficheskiye komplekсы Yeniseyskogo kryazha: osobennosti evolyutsii, vozrastnyye rubezhi i skorost' eksyumatsii [Collisional metamorphic complexes of the Yenisei Ridge: features of evolution, age limits and exhumation rate]. *Geologiya i geofizika*, 2011, V. 52, No. 10, pp. 1593–1611. (In Russ.)
  9. *Nevol'ko P. A., Borisenko A. S., Travin A. V.* Vozrast Sovetskogo zolotorudnogo mestorozhdeniya (Yeniseyskiy kryazh) [Age of the Soviet gold deposit (Yenisei Ridge)]. *Metallogeniya drevnykh i sovremennykh okeanov*, 2008, No. 1, pp. 225–228. (In Russ.)
  10. *Novozhilov Yu. I., Gavrilov A. M.* Zoloto-sul'fidnyye mestorozhdeniya v uglerodisto-terrigenykh tolshchakh [Gold-sulfide deposits in carbonaceous-terrigenous strata]. Moscow, TSNIGRI publ., 1999, 175 p. (In Russ.)
  11. *Nozhkin A. D., Borisenko A. S., Nevol'ko P. A.* Etapy pozdneproterozoyskogo magmatizma i vozrastnyye rubezhi zolotogo orudneniya Yeniseyskogo kryazha [Stages of Late Proterozoic magmatism and age limits of gold mineralization in the Yenisei Ridge]. *Geologiya i geofizika*, 2011, V. 52, No. 1, pp. 158–181. (In Russ.)
  12. *Pavlov S. Kh., Chudnenko K. V.* Issledovaniye proiskhozhdeniya metanovykh i azotnykh termal'nykh vod metodom komp'yuternogo modelirovaniya [Study of the origin of methane and nitrogen thermal waters by computer simulation]. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Nauki o Zemle*, 2013, V. 6, No. 1, pp. 133–146. (In Russ.)
  13. *Petrov V. G.* Usloviya zolotonosnosti severnoy chasti Yeniseyskogo kryazha [Gold-bearing conditions in the northern part of the Yenisei Ridge]. Novosibirsk, Nauka publ., 1974, 138 p. (In Russ.)
  14. *Prokof'yev V. Yu.* Geokhimicheskiye osobennosti rudoobrazuyushchikh flyuidov gidrotermal'nykh mestorozhdenii zolota razlichnykh geneticheskikh tipov: (po dannym issledovaniya flyuidnykh vkluchenii) [Geochemical features of ore-forming fluids of hydrothermal gold deposits of various genetic types: (according to the study of fluid inclusions)], Novosibirsk, Nauka. Sibirskaya izdatel'skaya firma RAN publ., 2000, 192 p. (In Russ.)
  15. *Redder E.* Flyuidnyye vklucheniya v mineralakh [Fluid inclusions in minerals]. V. 1, Moscow, Mir publ., 1987, 560 p. (In Russ.)
  16. *Sverdlova V. G., Shvedenkov G. Yu., Tomilenko A. A.* et al. Opredeleniye ob'yemov fazovogo perekhoda gaz-zhidkost' v sisteme CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>-N<sub>2</sub> v svyazi s zadachami termobarogeokhimi [Determination of the volumes of the gas-liquid phase transition in the CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>-N<sub>2</sub> system in connection with problems of termobarogeochemistry]. *Geokhimiya*, 1999, No. 5, pp. 494–505. (In Russ.)
  17. *Bakker R. J.* Package FLUIDS 1. Computer programs for analysis of fluid inclusions data and for modeling bulk fluid properties. *Chemical Geology*, 2003, V. 194, pp. 3–23.
  18. *Kerkhof A. M.* The system CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>-N<sub>2</sub> in fluid inclusions: theoretical modelling and geological applications. PhD, Amsterdam, Vrije Universiteit, 1988, 206 p.
  19. *Naumov E. A., Borisenko A. S., Nevolko P. A.* et al. Gold-sulfide (Au-As) deposits of the Yenisei Ridge (Russia): age, sources of metals and nature of fluids. *Proceedings of 13th Biennial SGA Meeting*, 24–27 August (Anne-Sylvie André-Mayer, Michel Cathelineau, Philippe Muchez, Eric Pirard and Sven Sindern, eds.), V. 1, 2015, pp. 165–168.
  20. *Sazonov A. M., Lobanov K. V., Zvyagina E. A.* et al. Olympiada Gold Deposit, Yenisei Ridge, Russia. *SEG Special Publications*, 2020, No. 23, pp. 203–226.
  21. *Silyanov S. A., Sazonov A. M., Naumov E. A.* et al. Mineral Paragenesis, formation stages and trace elements in sulfides of the Olympiada gold deposit (Yenisei Ridge, Russia). *Ore Geology Reviews*, 2022, V. 143, pp. 104750

Статья поступила в редакцию 27.02.23; одобрена после рецензирования 07.03.23; принята к публикации 09.03.23.  
The article was submitted 27.02.23; approved after reviewing 07.03.23; accepted for publication 09.03.23.